
Jäger, Gerd:

Anwendung von Miniaturinterferometern in Nanomessgeräten

Zuerst erschienen in:

Sensoren, Signale, Systeme / Bonfig, Karl W. (Hrsg.).

Kreuztal : b-Quadrat Verl., 2004

messen, prüfen, automatisieren 5

ISBN 3-933609-19-4

S. 187 - 198

Anwendung von Miniaturinterferometern in Nanomessgeräten

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Prof. h. c. Gerd Jäger

Zusammenfassung

Es werden Miniaturinterferometer beschrieben, die kleine geometrische Abmessungen besitzen, vollständig lichtwellenleitergekoppelt sind und universell angewendet werden können. Nach der Beschreibung des Aufbaues und der Wirkungsweise der Miniaturinterferometer schließt sich eine messtechnische Analyse an. Die vielfältige Anwendbarkeit der Miniaturinterferometer wird an folgenden Gerätebeispielen erläutert:

- Metrologisches Rasterkraftmikroskop
- Nanopositionier- und Nanomessmaschine
- Laserinterferometrischer Kraftsensor
- Laserinterferometrisches Vibrometer.

Keywords: Miniaturinterferometer, Tripelreflektor, Planspiegelreflektor, Lichtwellenleiter, Rasterkraftmikroskop, Nanomessmaschine, laserinterferometrischer Kraftsensor, Laservibrometer

1. Einleitung

Laserinterferometrische Messverfahren werden in der Präzisionsmess- und -positioniertechnik vorteilhaft angewendet, da sie in einzigartiger Weise hohe Auflösung und Genauigkeit auch bei großen Messbereichen aufweisen. Vielseitigkeit und universelle Anwendbarkeit der laserinterferometrischen Verfahren werden mit keinem anderen Messprinzip erreicht /1/. Um diese Verfahren auch für die modernen Gebiete der Mikro- und Nanotechnik erschließen zu können, dürfen die Interferometermessköpfe nur kleine Abmessungen besitzen und sollten möglichst unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen sein /2/. Solche sogenannten Miniaturinterferometer wurden am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau entwickelt und werden von der SIOS Messtechnik GmbH produziert /3, 4/. Die besonderen messtechnischen Eigenschaften der Miniaturinterferometer konnten durch die Anwendung preiswerter Optiktechnologien, die Realisierung kleinster Abmessungen und durch Lichtwellenleiterkopplung mit den Laserlichtquellen und der elektronischen Auswerteeinheit erreicht werden.

Im folgenden Beitrag werden Aufbau und Wirkungsweise verschiedener Typen von Miniaturinterferometern erläutert. Dabei handelt es sich sowohl um Miniaturinterferometer mit Tripelreflektoren als auch um solche mit Planspiegelreflektor. Anhand einer messtechnischen Analyse erfolgt die Erläuterung der Vorteile und der Grenzen der Miniaturinterferometer.

Die vielfältige Anwendbarkeit der Miniaturinterferometer in der Mikro- und Nanotechnik wird am Beispiel eines Rasterkraftmikroskopes, einer Nanopositionier- und Nanomessmaschine, eines laserinterferometrischen Kraftsensors und eines Vibrometers erläutert.

2. Aufbau und Wirkungsweise der Miniaturinterferometer /1/

Bild 1 zeigt die Systemkomponenten der Miniaturinterferometer. Die Interferometermessköpfe sind sowohl mit der Laserlichtquelle als auch mit der Auswerteelektronik mittels Lichtwellenleiter verbunden. Prinzipiell erlauben die Interferometer nur die Messung optischer Wegänderungen. Werden die Größen Kraft, Masse, Beschleunigung und Druck mit Hilfe mechanischer Wandlungselemente auf eine Wegänderung abgebildet, so können auch diese Größen mit interferometrischer Präzision gemessen werden.

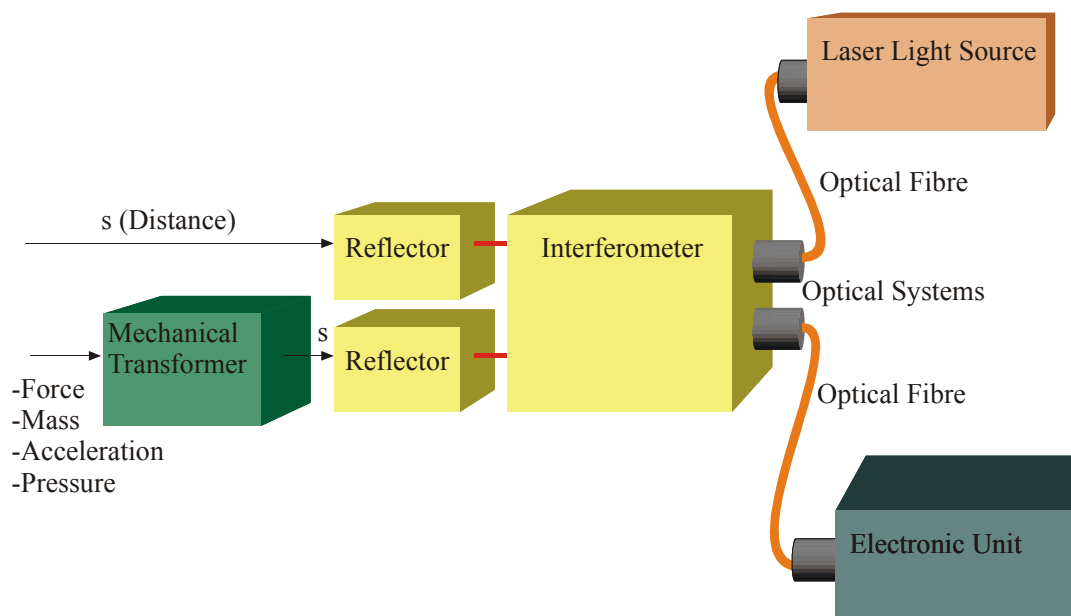


Bild 1: Systemkomponenten der Miniaturinterferometer

Das Prinzipbild des entwickelten Miniaturinterferometersystems ist im Bild 2 dargestellt. Dieses System weist folgende Eigenschaften auf:

- Modularer Aufbau der Interferometer und der Auswerteelektronik,
- Einfache Anpassung an unterschiedliche Aufgaben,
- Kleinste Abmessungen der Interferometermessköpfe,
- Vollständige Lichtwellenleiterkopplung,
- Nanometerauflösung und –genauigkeit bei Messbereichen von 5 m.

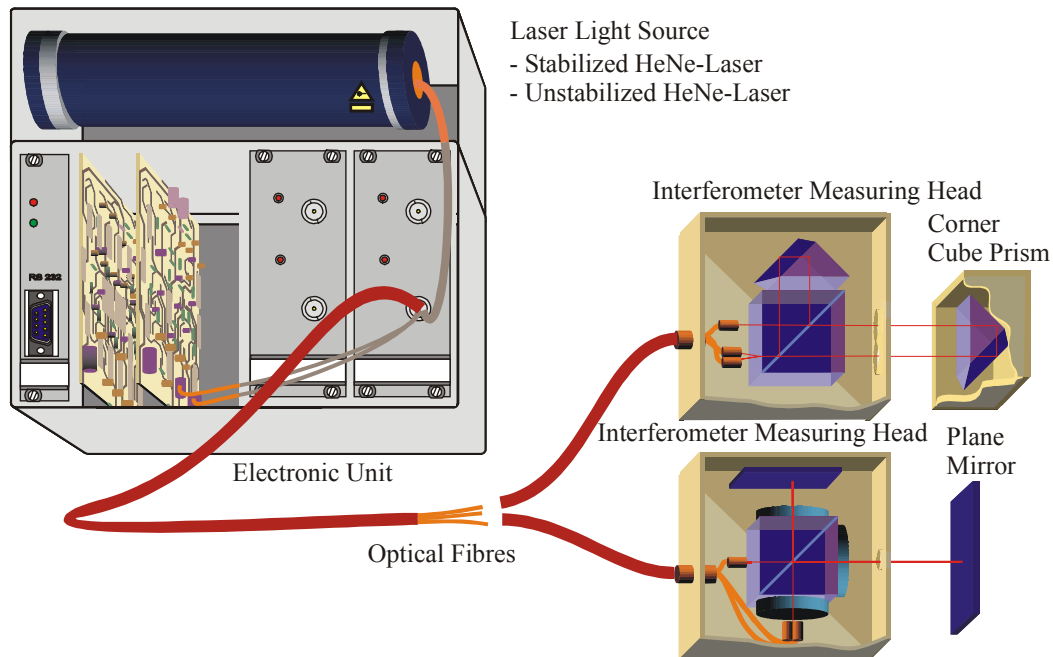


Bild 2: Laserinterferometrisches Miniaturinterferometersystem

Beide Interferometertypen werden für die Nanomess- und Nanopositionierung in der Mikro- und Nanotechnik benötigt. Nur Interferometer mit Planspiegelreflektor (Bild 2, Bild 3) ermöglichen eine planare und räumliche Koordinatenmessung. Interferometer mit Tripelreflektor (Bild 2, Bild 4) besitzen eine relativ große Kippinvarianz.

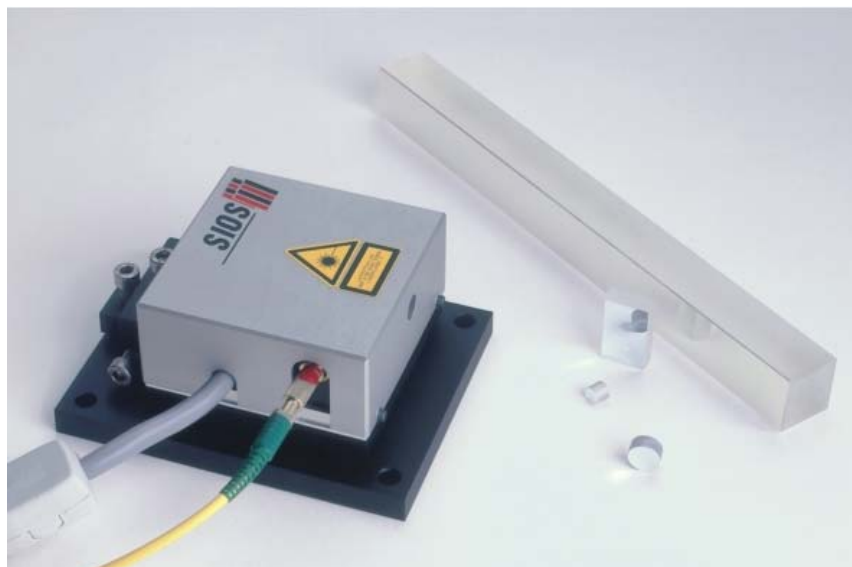


Bild 3: Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor

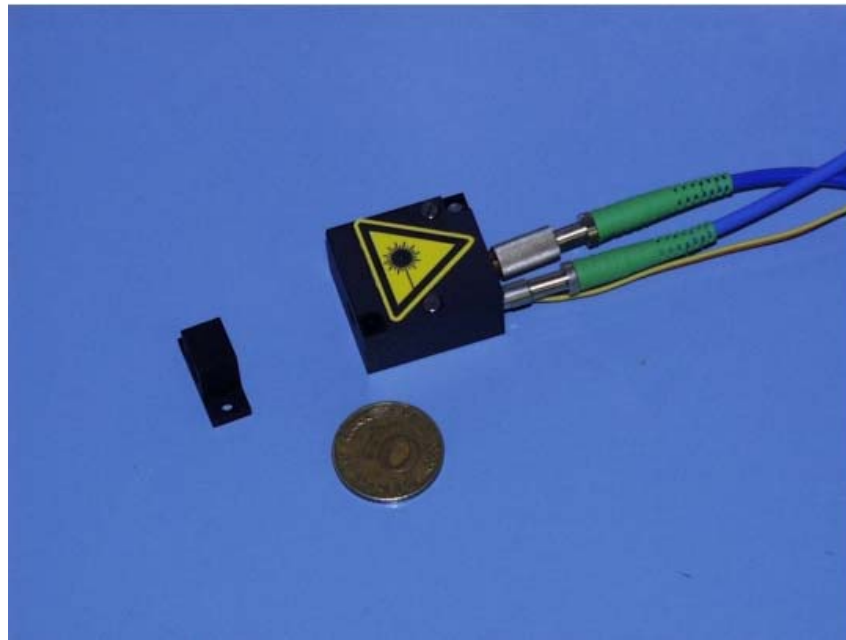


Bild 4: Miniaturinterferometer mit Tripelreflektor

3. Messtechnische Analyse

Unter der Annahme, dass in den Miniaturinterferometern ebene und kohärente Teilwellen interferieren, kann die Intensitätsverteilung des Interferenzbildes durch Gleichung (1) beschrieben werden [1]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{\lambda_0} n \cdot i \cdot s\right) \quad (1)$$

γ - Phasenwinkel vor der Messung

λ_0 - Vakuumwellenlänge

n - Brechungsindex

i - Interferometerfaktor

s - zu messender Weg

Aus Gleichung (1) folgt:

$$s = \frac{\delta \cdot \lambda_0}{i \cdot n} \quad (2)$$

δ - Ordnungszahl der Interferenz

Aus Gleichung (2) kann die kleinste auflösbare Wegänderung s_q abgeleitet werden:

$$s_q = \frac{\lambda_0}{e \cdot i \cdot n} \quad (3)$$

e - elektronischer Interpolationsfaktor

Gleichung (3) verdeutlicht, dass mit Interferometern außergewöhnliche Auflösungen erreicht werden können. Mit dem heutigen Stand der elektronischen Auswertetechnik sind Auflösungen < 1 nm möglich.

Die Genauigkeit bzw. die Messunsicherheit hängt entsprechend Gleichung (2) von verschiedenen Einflussfaktoren ab:

- Quantisierungs- und Demodulationsfehler
- Unsicherheit bei der Bestimmung des Luftbrechungsindex n
- Unsicherheit bei der Ermittlung der Vakuumwellenlänge λ_0 .

Bei der praktischen Messung mit Interferometern können folgende Fehlereinflüsse zusätzlich auftreten:

- Beleuchtungsaperturfehler
- cos-Fehler im Interferometer
- sin- und cos-Fehler bei der Bewegung des Messreflektors.

4. Anwendungen von Miniaturinterferometern für Präzisionsmessungen in der Mikro- und Nanotechnik

4.1 Metrologisches Rasterkraftmikroskop

Im Bild 5 ist das vereinfachte Prinzip des Rasterkraftmikroskopes VERITEKT, CZ Jena, dargestellt /5, 6/. Ein 3D-Einkörperscanner trägt die piezoelektrischen Antriebssysteme sowie die kapazitiven Messsysteme. In diesem Rasterkraftmikroskop führt die Verletzung des Abbe-Komparatorprinzips zu erheblichen Messfehlern:

$$f_x = L_x \cdot \sin \beta \quad (4)$$

$$f_y = L_y \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

$$f_z = L_z (\cos \alpha + \cos \beta - 2) \quad (6)$$

L_x, L_y, L_z - Abstände zwischen den kapazitiven Messsystemen und der Cantileverspitze

α, β, γ - Kippwinkel um die x-, y- und z-Achse

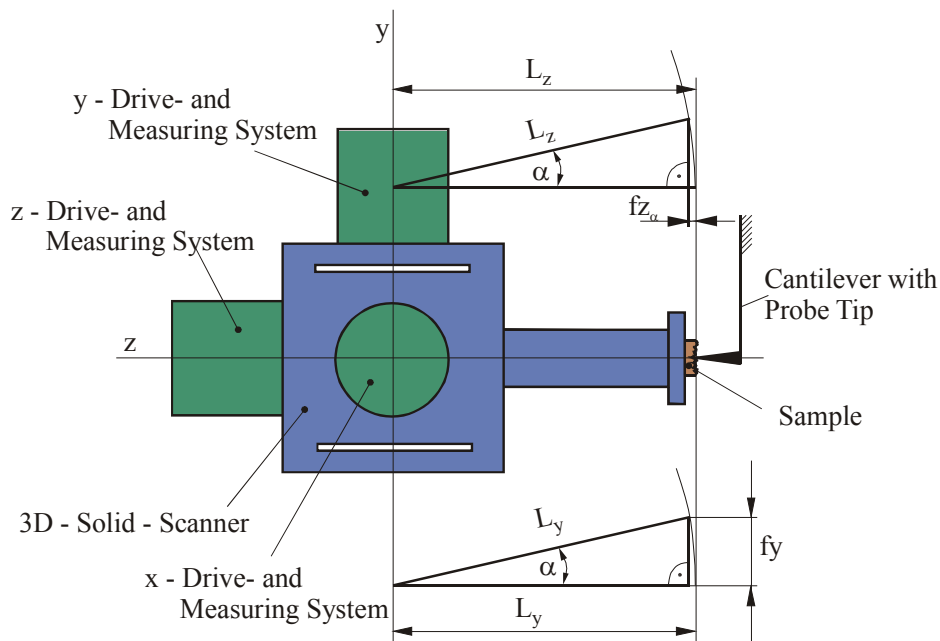


Bild 5: Prinzip des Rasterkraftmikroskopes VERITEKT

Zur Realisierung eines metrologischen Rasterkraftmikroskopes, bei dem die Messungen auf nationale Normale zurückgeführt werden, wurde ein 3D-Miniaturplanspiegelinterferometer so eingebaut, dass in allen Messachsen das Abbe-Komparatorprinzip verwirklicht ist (Bild 6). Der Umbau des VERITEKT zu einem metrologischen Rasterkraftmikroskop erfolgte im Auftrag und in Kooperation mit der PTB Braunschweig. An einem geeigneten Strukturnormal wurde mit dem neuen Rasterkraftmikroskop in der PTB eine erweiterte Messunsicherheit von nur 0,2 nm ($K = 2$) erreicht.

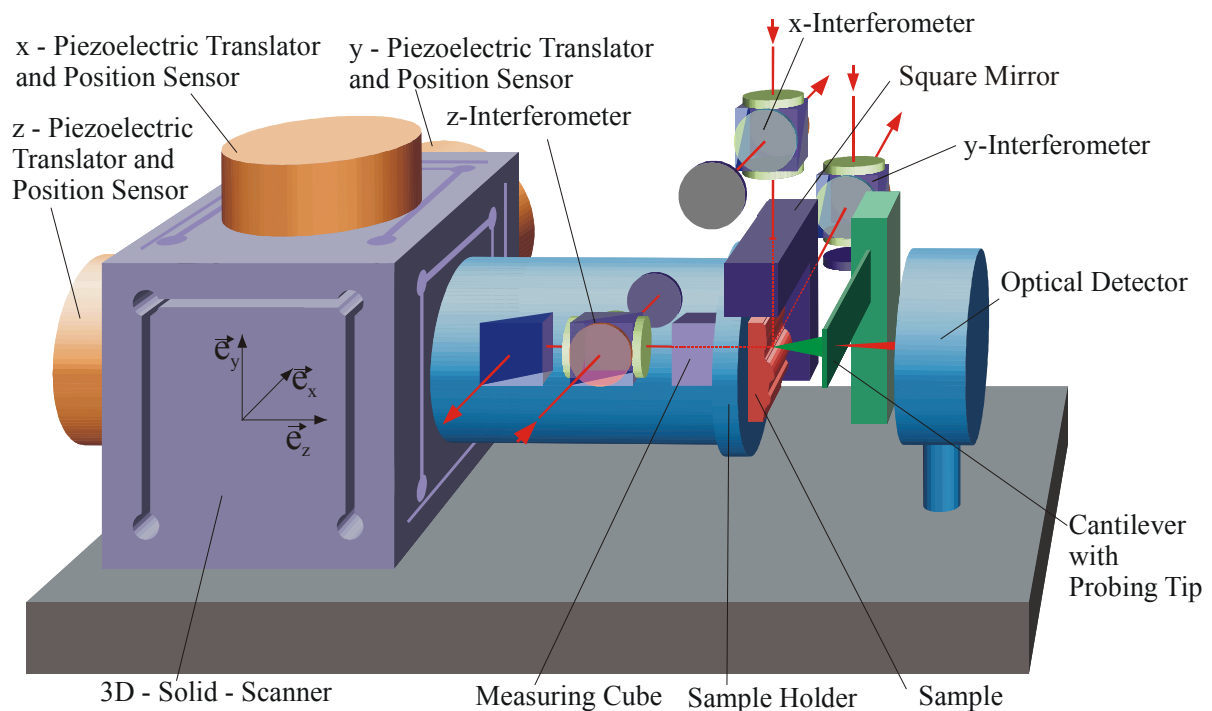


Bild 6: Metrologisches Rasterkraftmikroskop

4.2 Nanopositionier- und Nanomessmaschine

Eine weitere Anwendung von Miniaturinterferometern mit Planspiegelreflektoren zeigt Bild 7. Mit Hilfe von drei Miniaturinterferometern, einer Raumspiegelecke, zweier hochauflösender Winkelsensoren sowie von x-, y-, z-Führungen und –Antrieben konnte eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine mit einem Messvolumen von 25 mm x 25 mm x 5 mm, einer Auflösung von 0,1 nm und einer Messunsicherheit von 5 – 10 nm realisiert werden [6, 7]. Auch hier ist das Abbe-Komparatorprinzip in allen Messachsen eingehalten. Die Bewegung der Raumspiegelecke wird mittels der Winkelsensoren und der Miniaturinterferometer so geregelt, dass die Führungsfehler nahezu keinen Einfluss auf das Messergebnis haben. Die realisierte Maschine ist im Bild 8 zu sehen.

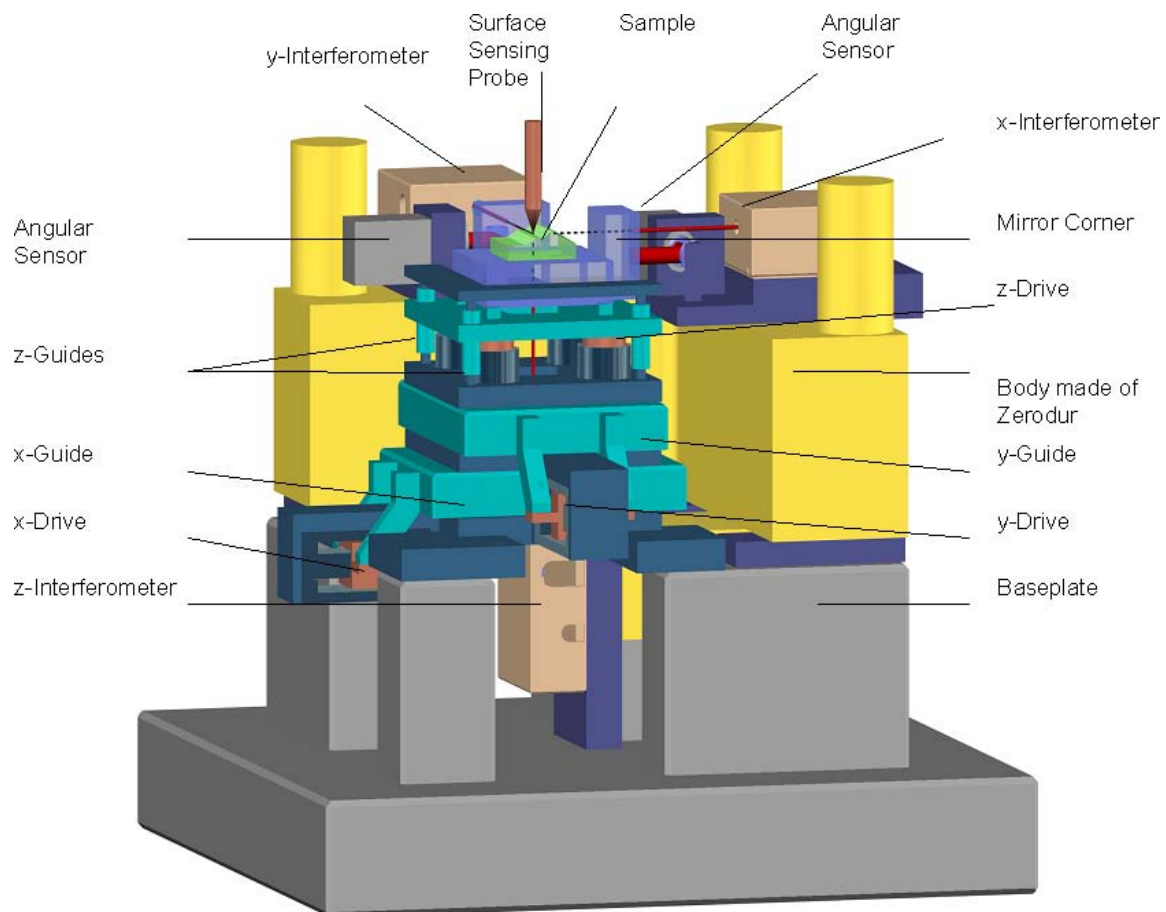


Bild 7: Aufbau der Nanopositionier- und Nanomessmaschine

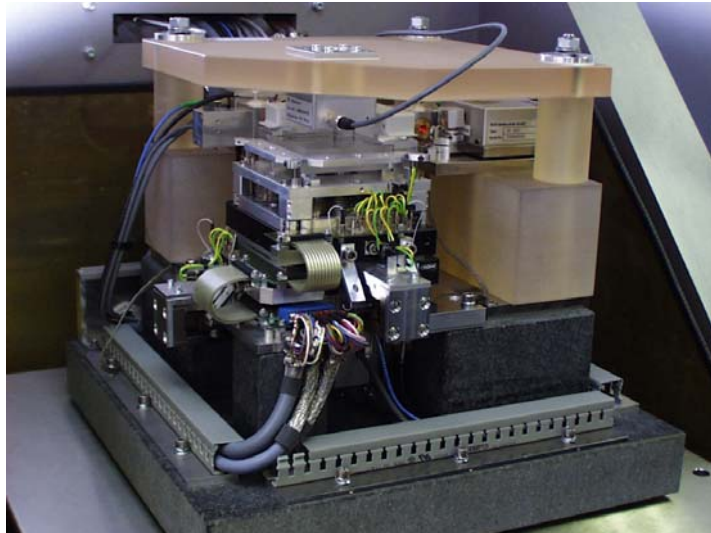


Bild 8: Nanopositionier- und Nanomessmaschine mit optischem Sensor

4.3 Laserinterferometrischer Kraftsensor

Der Aufbau des laserinterferometrischen Kraftsensors ist schematisch im Bild 9 dargestellt /8/. Die Gewichtskraft F bewirkt eine Auslenkung der Parallelfederanordnung. Die Parallelfedern bestehen aus hochwertigem Quarzglasmaterial. Die Erfassung der Federauslenkung bei einwirkender Gewichtskraft erfolgt durch ein vollständig lichtwellenleitergekoppeltes Miniaturinterferometer mit Tripelreflektor. Hier erweist sich der Tripelreflektor als vorteilhaft, da infolge seiner Kippinvarianz auch bei Verkippungen und Verdrehungen der Parallelfedern das Interferenzbild nicht beeinflusst wird. Der laserinterferometrische Kraftsensor ermöglicht bei einem Kraftmessbereich von 0 – 0,1 N eine Auflösung von 10 μN mit einer erweiterten Messunsicherheit $< 10 \mu\text{N}$. Auflösungen $< 1 \mu\text{N}$ sind möglich. Eine erfolgreiche Anwendung des beschriebenen Kraftsensors besteht in der Prüfung (Kalibrierung) von Applanationstonometern.

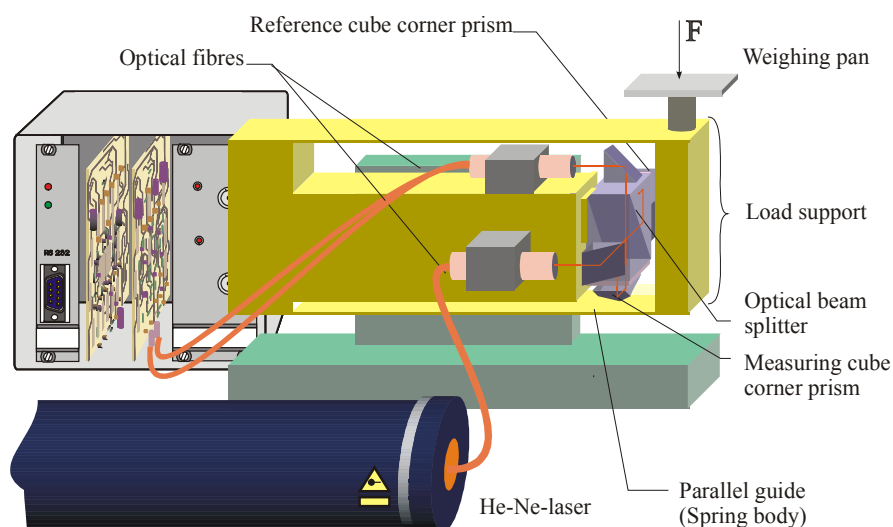


Bild 9: Laserinterferometrischer Kraftsensor

Bild 10 zeigt die Prüfeinrichtung mit laserinterferometrischem Kraftsensor, die erstmals eine automatische Tonometerkalibrierung ermöglicht.



Bild 10: Tonometerprüfeinrichtung mit laserinterferometrischem Kraftsensor

4.4. Laserinterferometrisches Vibrometer

Die Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor arbeiten nach dem Prinzip der Homodyninterferometrie. Um ihre volle Leistungsfähigkeit zu erreichen (Messbereich = 5 m, Auflösung = 0,1 nm, relative Messunsicherheit = 10^{-7}), sind hochreflektierende Planspiegel erforderlich. Damit auch Vibrationsmessungen an rauen Oberflächen mit kleinem Reflexionsgrad durchgeführt werden können, wurde ein neues Vibrometer nach dem Homodynprinzip entwickelt und erfolgreich erprobt [9]. Der prinzipielle Aufbau ist im Bild 11 zu sehen. Das Vibrometer gestattet die Erfassung von Amplituden-Frequenz-Spektren von 0 – 500 kHz mit einer Auflösung von 0,1 nm an beliebig rauen Oberflächen mit einem Reflexionsgrad $\geq 5 \cdot 10^{-4}$.

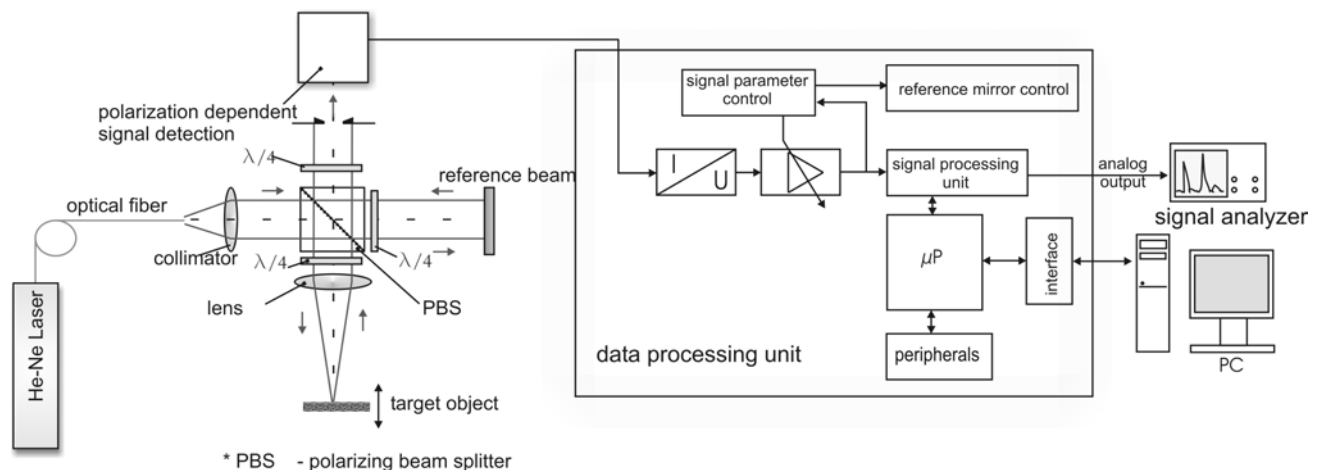


Bild 11: Prinzipieller Aufbau des Vibrometers

Danksagung

Die Autoren danken allen Kollegen der TU Ilmenau und der SIOS Messtechnik GmbH, die an der Entwicklung der Miniaturinterferometer und deren vielseitigen Anwendungen mitgewirkt haben. Unser Dank gilt dem Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung der Forschungsprojekte.

Literatur

- /1/ Jäger, G.: Lasernanomesstechnik – Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungen in der modernen Gerätetechnik. 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. TU Ilmenau, September 1999. S. 43 – 44
- /2/ Jäger, G. : Precision distance measurement by means of miniaturized interferometers. Proceedings of the XIII. IMEKO World Congress, Volume 3., S. 1712 - 1716. Torino, Italy, September 1994
- /3/ Jäger, G.; Grünwald, R.; Manske, E.: Lichtwellenleitergekoppelte interferenzoptische Sensoren. Tm 57 (1990) 9, S. 319 – 322
- /4/ Nanometrology with Miniature Laser Interferometers. Brochure of SIOS Meßtechnik GmbH, Germany
- /5/ Büchner, H.; Jäger, G.; Manske, E.: Laserinterferometrically assisted 3D-nanometrology on the atomic force microscope type VERITEKT. euspen 1st international conference. May 1999
- /6/ Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T.; Büchner, H.; Grünwald, R.; Schott, W.: Nanomeasuring technology – nanomeasuring machine. 16th Annual Meeting, Crystal City, Arlington, Virginia, November 2001, ASPE, Proceeding, S. 23 – 27
- /7/ Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T.; Schott, W.: Operation and Analysis of a Nanopositioning and Nanomeasuring Machine. 17th Annual Meeting, ASPE, St. Louis 2002, USA, Proceedings, S. 299 – 304
- /8/ Jäger, G.; Füßl, R.; Gerhardt, U.: Optical interference force measuring and weighing cells for dynamic weighing of small loads. XV. IMEKO World Congress Osaka, Japan, June 13 – 18. 1999, Volume III, S. 39 – 42
- /9/ Dontsov, D.; Jäger, G. ; Gerhardt, U. : Homodyne fibre coupled laser vibrometer. euspen 2003, Aachen, Germany